引用格式：汪卫华. 非晶合金材料发展趋势及启示. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 352-359.
Wang W H. Development and implication of amorphous alloys. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(3): 352-359. (in Chinese)

非晶合金材料发展趋势及启示

汪卫华

1 松山湖材料实验室 东莞 523808
2 中国科学院物理研究所 北京 100190

摘要 金属材料的发展与人类文明和进步息息相关。非晶合金材料是一类原子结构长程无序，具有独特优异性能的新型金属材料。近年来，非晶合金材料的研发、相关科学问题的研究、在高新技术领域的应用得到快速发展，并对金属材料的设计和研发、结构材料、绿色节能材料、磁性材料、催化材料、信息材料等领域产生深刻的影响。为此，文章在回顾非晶合金材料研究和研发历史过程的基础上，分析了当前其学科的前沿科学问题、发展方向，以及我国在该领域发展的问题、机遇和挑战，并提出相应的启示和建议，以期为加快新金属材料的发展，特别是在高新技术领域的应用提供管窥之见。

关键词 非晶合金材料，进展，科学问题，应用，启示

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20211208008

金属材料与人类万年文明发展史息息相关，金属材料的开发和使用，往往成为划分人类不同文明时代的里程碑，如青铜时代、铁器时代、钢铁时代等。每次金属材料的发展都会极大地推动人类社会文明和生产力的巨大进步。非晶合金是近几十年来通过现代冶金新技术——快速凝固技术和熵调控理念——抑制合金熔体原子的结晶，保持和调控熔体无序结构特征而得到的一类新型金属材料，也称金属玻璃，或液态金属[1]。这种材料是通过调制材料结构“序”或“熵”这一全新途径和理念而合成的，兼具玻璃、金属、固体、液体等物质特性的新金属材料[2]；其颠覆了传统金属材料从成分和缺陷出发设计和制备的思路（图 1），突破金属材料原子结构有序的固有概念，把金属材料的强度、韧性、弹性、抗腐蚀、抗辐照等性能指标提升到前所未有的高度，改变了古老金属结构材料的面貌。非晶、高熵等无序合金在基础研究和技术应用中已表现出重要意义和战略价值，在能源、信息、环保节能、航空航天、医疗卫生和国防等高新技术领域发挥着愈加重要作用。无序合金领域的基础研究将继续推动材料科技革命和对材料行为的更深入

资助项目：中国科学院学部学科发展战略研究项目（2017-JS-A-3），中国科学院战略性先导科技专项（B类）（XDB30000000），国家自然科学基金基础研究中心项目（61888102），国家自然科学基金重大项目（11790291）

修改稿收到日期：2022年1月26日；预出版日期：2022年2月9日

理解，并能产生新的材料设备和系统。

1 非晶合金材料的研发态势及进展

1.1 非晶合金研发态势

非晶合金材料的研发出现过4次高峰，已研发出铁、铜、锆和稀土基等近百种非晶合金体系。第1次高峰期在1960年左右，美国加州理工大学的杜维兹教授发明了快速凝固冶金技术，首次制备出非晶合金[3,4]。第2次高峰期在20世纪80年代前后，在日本和美国等国家主导下，开发了非晶合金条带工业化技术、非晶合金粉末和薄膜制备技术，以及非晶合金软磁应用等[5]。第3次高峰期在20世纪90年代，主要由日本和美国主导；这个时期通过成分调控，极大提高金属熔体的粘滞系数，将非晶合金的临界尺寸从微米级提高到厘米级，非晶合金材料从此进入大块合金时代，极大地拓展了其应用范围和领域[6,7]。第4次高峰期在2000年以后，由美国和中国主导，中国近年非晶合金专利占比约76%；主要技术和进展涉及铁基、铜基、锆基等大块非晶合金制备和应用、带材在配电变压器、软磁芯方面的大规模应用，高熵合金材料、高熵非晶材料的发明，以及熵调控研发无序合金等概念的提出等[8-10]。无序合金主要包含非晶合金和高熵合金。非晶合金的主要特点是成分无序、结构长程无序；高熵合金的主要特征是结构有序但成分无序。

未来的无序合金发展趋势是开发新一代高性能、突破现有尺寸限制、低成本、具有功能特性的材料，拓展其在高频电机、航天和汽车、信息技术等领域的应用。2021年的诺贝尔物理学奖授予意大利科学家乔治 · 帕里西（G. Parisi），以表彰他对理解复杂无序物理系统的开创性贡献，也说明无序体系本身研究的重要科学意义。非晶和高熵等无序合金作为相对简单的无序体系，为研究物理和材料科学的基本问题提供了模型体系，将极大地推动复杂无序体系研究的发展[11,12]。

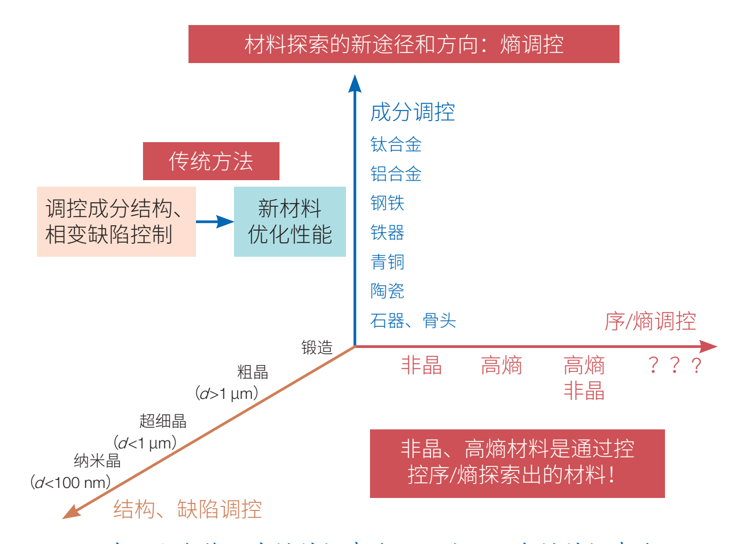


图1 非晶合金等无序材料探索途径和传统晶态材料探索途径的比较[2]

Figure 1 Comparison of exploring approaches between disordered amorphous and traditional crystalline materials[2]

1.2 我国无序合金研发已跃升国际一流水平

我国的非晶合金研发起步于20世纪70年代，当时美国、日本、苏联，以及德国、英国等欧洲国家是这个领域最活跃的国家。目前，日本和欧洲杰出科学家大多都已经退休，高水平后继者远不如以前多，技术和水平已逐渐落后。美国非晶合金材料领域研发经费较少，缺乏优秀的年轻科学家和技术队伍；目前，美国主要侧重非晶合金基础物理、模拟和机理研究，而应用探索主要集中在航空航天等高技术领域。目前，我国的非晶合金科研人员占全球2/3，年轻研究人员水平越来越高，研发水平已超过日本和欧盟，与美国相当，成为世界第一梯队。例如，迄今已在36个金属元素为基体的合金中找到能制备块体非晶合金组分，其中我国发现28个。

特别是近10年来，无序合金最重要的进展是研发出高熵合金。高熵合金是根植于熵调控设计思想开发出的化学成分复杂、没有主元素、结构有序、成分无序的无序合金材料，其极大拓展了材料开发的空间。高熵合金已展现出诸多奇特超凡的性能，其研究及应用已成为金属材料领域的研究热点。很多国外开发的

高熵合金有明显的军事装备需求的应用导向。我国台湾地区的科研人员，在非晶合金基础上首先研发出高熵合金，引领了无序合金领域的发展。

我国无序合金研发能够跃升国际一流是与我国科技投入的不断增加、基础研究的长期积累、制造业大国对新金属材料的产业需求，以及后备年轻人才辈出（国内培养和海外归国）密切相关。非晶合金领域基础研究的长期积累为这类新材料的工业应用提供了支撑和动力。同时，相关的基础研究也从工业应用中汲取问题来源和进步源泉。

1.3 基础科学问题对非晶合金材料研发的制约

基础科学难题是目前制约无序合金材料发展的最大瓶颈。由于无序结构的复杂性，现有固体物理和材料科学理论、模型和研究范式都无法有效解释和描述其结构及结构与性能关系、新现象，急需科学新理论、新方法和新范式。非晶合金材料领域当前面临四大类基础科学问题[13,14]：① 玻璃转变机制，即合金液体如何凝聚成结构长程无序、能量亚稳定的非晶态；② 形变机制，即结构无序合金体系如何耗散外力作用发生形变，其耗散能量的结构单元的标定；③ 非晶结构还没有统一模型能有效描述；④ 没有建立结构与性能、形成、形变之间的关系，这阻碍了非晶材料的高效研发、性能设计和调控。基础研究方面的突破性进展才能极大促进新型高性能无序合金材料的高效研发和性能优化。

2 非晶合金产业前景和挑战

2.1 非晶合金的主要应用场景

作为结构和功能一体化的新型金属材料，非晶合金产业化前景非常广阔。美国、日本、德国等国投入大量资金拓展其应用场景，并推动相关产业发展。美国液态金属科技、玻璃金属科技，日本日立金属，德国 VAC，以及我国宜安、台一科技等公司在非晶合金领域的研发水平、市场竞争力及产业规模均处全球领先水平。目前，非晶合金的主要应用领域有 4 个。

（1）高性能结构材料。由于非晶合金具有高强度（钴基超过 5 GPa，轻质钛基超过 2 GPa）、高韧性（钯基超过 200 $MPa/m^{1/2}$）、高弹性变形（2%）、自锐特性、抗辐照、抗腐蚀等特性，已经用作新一代的穿甲弹、破甲弹的战斗部、装甲材料等。空间装备通常会面临高温差、强辐照、强腐蚀、高应变等极端环境，对材料性能要求极高。非晶合金良好的综合性能可使其在空间环境冷热循环、空间环境高能粒子辐照等复杂环境中表现出高稳定性；其原子层级表面平整度，兼具低热膨胀系数及精密成形性能，有望作为空间反射镜的镜面材料聚焦阳光以实现月壤提炼、制氧等空间原位资源利用。此外，非晶合金能够满足航天器大型展开机构苛刻的性能要求，是航天器弹性展开机构的关键材料。

（2）软磁材料。非晶合金软磁及从非晶合金发展而来的纳米软磁和复合材料在软磁材料中的重要地位（图 2）[15]。由于具有高磁饱和强度、高磁导率、低矫顽力、低饱和磁致伸缩，以及极易完成磁化和去磁过程，非晶合金多项软磁性能远优于传统硅钢片材料及晶体磁性材料[15]。铁、镍、钴基非晶合金软磁条带、丝材和粉末已经广泛应用于各种变压器、电感器和传感器、磁屏蔽材料、无线电频率识别器等，是电力、电子和电子信息领域不可或缺的重要基础材料。以非晶合金为铁芯的配电变压器铁损仅为硅钢片的 1/5—1/10。经估算，我国约 30%—60% 电网损耗来自变压器，即使只替代现有变压器的 15%，其节电可达 90 亿度/年、CO_2 减排 800 万吨/年。非晶合金软磁制造技术也已经相当成熟，我国已成为继日本之后，世界上第二个拥有非晶合金变压器原材料量产能力的国家，已形成千亿级非晶铁芯高端制造产业集群，市场接近 1 000 亿元人民币。非晶合金软磁材料还将很快大量应用于快速发展的电子信息领域。这些领域的各种电子设备大量应用于轻、薄、小和高度集成化的开

关电源，所采用的手段是高频电子技术，这要求其中变压器和电感器的软磁铁芯适用于高频场合。具有高饱和磁感、高磁导率、低损耗、易于加工的块体非晶合金，可以直接熔铸或加工成各种复杂结构的微型铁芯，然后制成变压器或电感器，应用于各类电子或通信设备中。但是，非晶带材制备过程产生缺陷导致其抗突发短路性能较差，以及非晶磁致伸缩导致的噪音大、脆性仍是世界级难题。电机是工业生产和社会生活极为重要的动力设备，其耗电量在各类电器设备中居首，全球电机用电量占世界总用电量 50% 以上，占工业用电 70% 左右。在高频下，非晶合金电机铁芯可显著降低电机损耗，将效率提高 3%—20%。非晶合金电机功率密度高、重量轻、体积小、产生热量少，从而解决了传统高频器件中因需配备散热装置而导致体积过大的问题，有望在电动驱动、高速主轴、航空发电机和军事领域发挥重要作用。目前，国际尚未形成相关产业发展，松山湖材料实验室、中国科学院物理研究所等国内科研单位在国家自然科学基金重大项目的资助下，正在进行实验室阶段新一代非晶软磁材料的研发；并且，将与安泰等企业合作开展相关应用技术开发。

（3）催化材料。非晶合金独特的无序结构和表面本征的不均匀性，造就了其丰富的高活性位点；与晶态材料较单一的活性位点相比，非晶合金具有独特的本征催化活性、很强的活化能力和较密集的活性中心。非晶合金催化剂可以在很宽的范围内改变组成，用成分来调节电子结构，以获得更理想的催化活性中心，从而改善传统的多相催化剂的反应物内扩散而影响表面反应的问题，其已经被广泛应用于石油工业、环保等领域。

（4）制造业基础材料。非晶合金是制造业的基础材料。例如：基于非晶合金的柔性齿轮弹性高于常规金属数十倍，具有结构简单、传动比大、体积小、寿命长等诸多优点，即使是在太空等严酷环境条件下也可以正常工作，并且不需在进沙粒后加润滑油，可用于火箭、卫星、飞机、坦克及雷达中的随动系统和真空密封传动，机器人手臂连接，以及精密测试领域等。例如，比亚迪公司通过改进铁基、铜基、锆基非晶合金制备工艺，制造电池薄膜电极等。

2.2 非晶合金材料产业化的挑战和机遇

在很多科研成果的产业转化过程中都会因各种因素造成其失败，即在转化过程中存在“死亡谷”

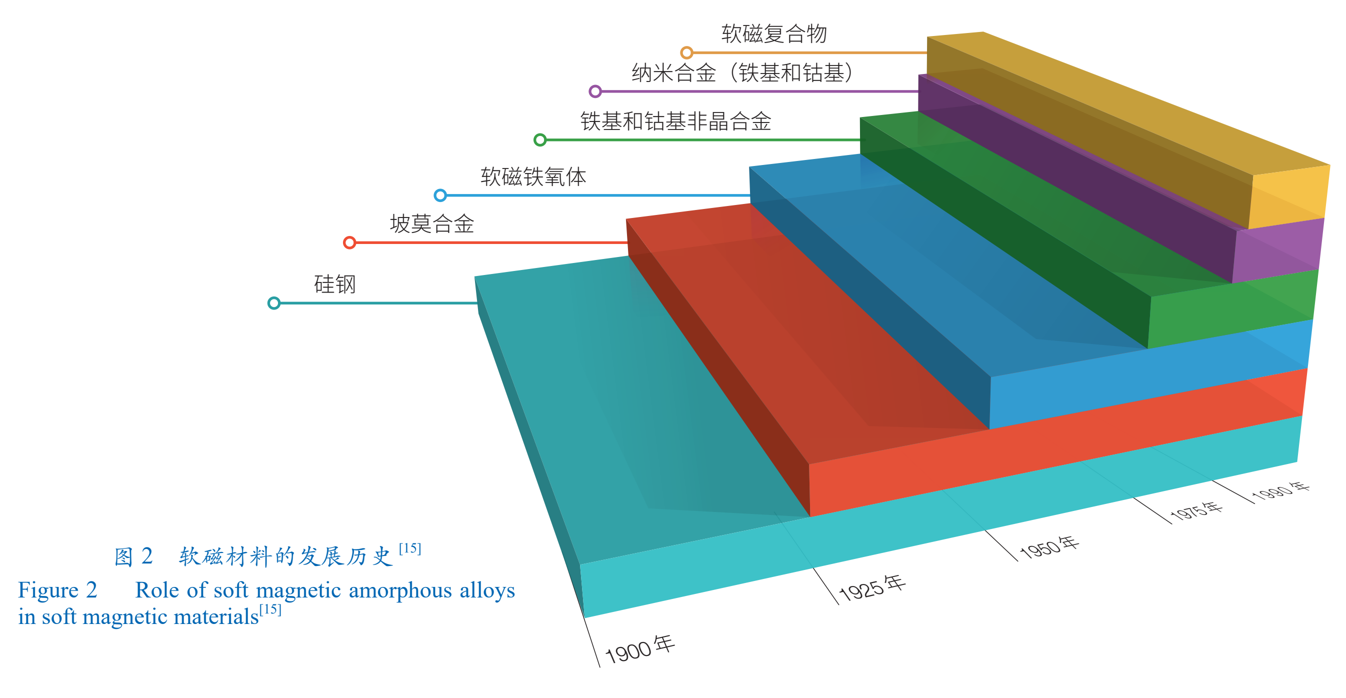


图 2　软磁材料的发展历史[15]

Figure 2　Role of soft magnetic amorphous alloys in soft magnetic materials[15]

（图 3）。在非晶合金领域，我国相关专利申请量全球排名第一，但还缺少具有国际水平的龙头企业。虽然我国拥有庞大的非晶合金应用市场，但目前正在使用的材料多是基于国外早期开发的体系，很多国内研发的新非晶合金体系没有得到规模应用。国内强大的实验室非晶合金的研发能力和企业、市场关联性不强。在过去的十几年，我国块体非晶合金大规模工业应用的瓶颈一直没有被突破。

非晶合金科研成果的成功市场转化需要人才、技术、资本、管理方面的有机结合。国内已有十几年的非晶合金基础和应用研究积累，有蓬勃发展的、最健全的制造业和较低的产业化门槛，新一代块体非晶合金的应用研究极有可能在中国取得突破性进展。例如，广东的松山湖材料实验室聚集各种创新转化的充足资源，包括人才、资本、产业集群，还有政府支持的新机制和灵活的政策等，形成一种健康的、有利于科技成果产业化的优越环境；期待能和相关企业一起共同开发出面向第三代半导体电子元件的高频软磁、柔性齿轮、高性能 3C 器件等非晶合金材料。

目前，用于器件电源和电感的软磁材料饱和磁感低、高频损耗高，这严重制约了氮化镓、碳化硅等第三代半导体电子元件提高功率密度和工作频率，使其优势难以充分发挥。研制匹配第三代半导体器件功率密度和工作频率的软磁材料，有望促进第三代半导体在大功率、高频器件中的应用，进而推动 5G 通信基站、卫星通信、雷达航空、智能汽车等关键领域的发展。同时，国内相关研究所、大学也在和宜安、台一、青岛云路等国内企业合作，努力把非晶合金、高熵合金推向绿色节能、环保，以及超灵敏的探测器和传感器材料、航天材料、机器人等应用领域。

3 无序合金材料发展的启示与建议

新材料产业是战略性、基础性产业，也是高科技竞争的关键领域，新的结构材料或功能材料的发展将会对科技和社会发展产生重要影响。在金属材料领域，非晶、高熵等无序合金作为新金属材料，具有广泛应用场景，且我国已具备国际先进的科技研发优势；通过在金属材料这个老材料领域中引入新理念，创造性工艺和技术，发展丰富产业应用场景，完全可使得金属材料研究和产业在国内有个飞跃发展，带动金属材料产业升级。为了在新的历史时期顺应科技成果转化发展的规律，加快推动无序合金材料研发新模式的建立，优化无序合金的研发体制，提出 5 点建议。

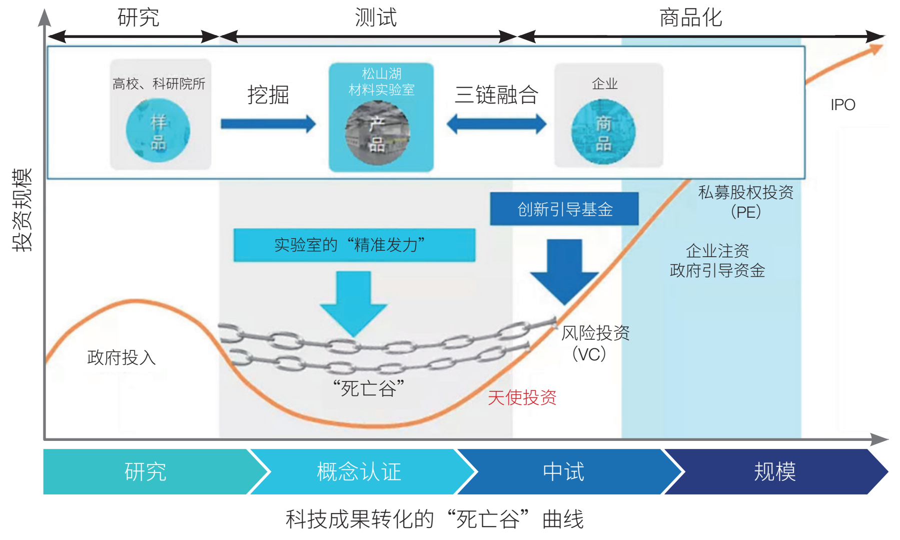


图 3　松山湖材料实验室全链条材料研发模式

Figure 3　Materials development mode in Songshan Lake Materials Laboratory

（1）重视非晶和高熵等无序合金关键基础科学和技术问题攻关。非晶等无序合金研究和应用中仍有大量关键科学和技术问题尚未解决。建议搭建研究机构和企业合作创新平台和无序合金研究中心，聚焦解决制约无序合金大规模应用的重大基础科学问题和技术瓶颈，包括：探索无序合金形成规律及影响因素；引入新的材料研发理念，发展新的制

备方法和表征技术；与材料数据库结合，实现按需设计开发新的无序合金材料；开发块材无序合金规模化制备加工装备和技术。

（2）推动非晶等无序合金与多学科交叉融合。当今科研和技术应用、科技机构、科学探索和产业研发之间的边界正在流动且日益模糊。如何处理上述互动关系成为非晶合金研发和应用重要机制问题。目前，我国非晶合金产业化水平滞后于科技发展，企业创新能力和规模不够。建议：① 国家层面组织凝练和聚焦影响无序合金发展前景的关键应用技术和科学问题，有计划、有部署地对其提供持续性资助，科研院所、高校、企业联合攻关；国家层面研发资源与企业资源紧密融合，发展完整非晶合金材料“设计—研发—应用”全链条研究和应用模式，挖掘更多应用场景，实现其在更多领域的应用。例如，对技术较成熟的非晶合金软磁，开发新一代高性能材料，实现制备流程自动化和智能化，提升市场占有率并积极开拓国际市场。② 促进非晶合金材料在重大交叉领域取得跨越式发展。例如，在软物质领域，非晶合金与软物质交叉研究可凝练出共同的前沿问题，建立普适理论框架；在信息领域，推动非晶合金满足后摩尔时代信息材料对多功能特性的集成要求；在新能源领域，利用非晶合金独特结构特征、力学和电化学性能，使其成为极具潜力新型储氢材料、节能材料；在生物医药领域，非晶合金高强度、低弹性模量及较好生物相容性，使其作为生物植入物具有良好应用前景。

（3）引入材料基因工程、人工智能，大数据等新理念，并发挥科学大装置的作用。21 世纪以来，大数据、人工智能、信息技术快速发展，从而深刻地改变材料研发的格局和范式，极大地推动材料研发和应用的进步。初步研究表明，材料基因工程、人工智能、大数据等新理念和新方法，以及中子散射、阿秒激光等大科学装置对非晶合金材料的研发将产生颠覆性影响，可极大提高研发和应用效率和成本。

（4）提升产业底层基础技术，全面带动无序合金材料产业升级。新的无序合金，如第三代块体非晶合金①、高熵合金研究进展很大，但是目前我国非晶合金产业仍主要是第一代的非晶条带和粉末，亟待产业升级。科研单位和科学家要通过合作帮助企业培养人才，提高其技术水平，并寻求新的应用场景和市场。通过带动非晶合金产业的升级，反过来促使无序合金基础研究的发展。通过机制设计，发挥财政资金的杠杆作用，加大国家对基础研究的投入力度，带动、提升地方和企业的科技投入水平，发挥市场对创新资源配置的决定性作用；同时，鼓励社会和企业资金参与，形成多元化非晶合金研发资源投入机制。

（5）重视新形势和新时期的学术交流和国际合作。非晶合金研发和应用要重视和充分利用信息时代的便利，促使非晶合金科学普及，宣传无序合金材料对社会带来的重大影响；同时，探索建立非晶合金研发、数据库和应用网络化平台，不同类型的新型研发机构模式和人才培养平台。

总之，在古老的金属材料领域，通过引入新的工艺、技术和研发理念，也能取得突破性进展。通过优化研发体制，研发全链条模式的建立，将促进新金属材料的大规模应用，推动社会、科技和文明的进步。

参考文献

1 Greer A L. Metallic glasses. Science, 1995, 267: 1947-1953.

2 汪卫华. 前言·从无序中发现有序，在纷繁和复杂中寻求简单和美. 中国科学：物理学 力学 天文学, 2012, 42(6): 547-550.

Wang W H. Editorial: Special Issue on Amorphous Alloys. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, 42(6): 547-550. (in Chinese)

① 第三代块体非晶合金是制临界尺寸超过分米的块体非晶合金体系；第二代大块非晶合金是指临界尺寸在厘米级的非晶合金。

3 Klement W, Willens R H, Duwez P. Non-crystalline structure in solidified gold—Silicon alloys. Nature, 1960, 187: 869-870.

4 汪卫华. 金属玻璃研究简史. 物理, 2011, 40(11): 701-709. Wang W H. A brief history of metallic glasses. Physics, 2011, 40(11): 701-709. (in Chinese)

5 Greer A L. Metallic glasses. Science, 1995, 267: 1947-1953.

6 Wang W H, Dong C, Shek C H. Bulk metallic glasses. Materials Science and Engineering: R: Reports : 2004, 44(2/3): 45-89.

7 Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. Acta Materialia, 2000, 48(1): 279-306.

8 "非晶物理研究进展"专辑. 物理学报, 2017, 66(17). Special Issue: Progress of Amorphous Physics. Acta Physica Sinica, 2017, 66(17). (in Chinese)

9 Special Issue: Bulk Metallic Glasses. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(36): 3895-3973.

10 魏秀, 冯泽, 于汉超, 等. 非晶合金材料基础研究的演化与国际影响. 世界科技研究与发展, 43(4): 403-419. Wei X, Feng Z, Yu H C, et al. Evolution and influence of basic research on amorphous alloys. World Sci-Tech R&D, 2021, 43(4): 403-419. (in Chinese)

11 Zallen R. The Physics of Amorphous Solids. Beilin:Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,1998.

12 de Gennes P G, Badoz J, Rubinstein M. Fragile objects: Soft matter, hard science, and the thrill of discovery. Physics Today, 1997, 50(4): 69-70.

13 Ngai K L. Relaxation and Diffusion in Complex Systems. New York: Springer New York, 2011.

14 Wang W H. Dynamic relaxations and relaxation-property relationships in metallic glasses. Progress in Materials Science, 2019, 106: 100561.

15 Silveyra J M, Ferrara E, Huber D L, et al. Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world. Science, 2018, 362: eaao0195.

Development and Implication of Amorphous Alloys

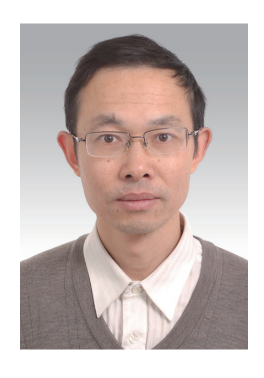
WANG Weihua

（1 Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China;

2 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China）

Abstract The development of metallic materials is closely correlated to the civilization of human being. Amorphous alloys with long-range disordered atomic microstructure, unique physical and mechanical properties, are advanced and novel metallic materials which have diverse industrial applications. Recently, the scientific research, new system development, and industry applications of the structural disordered alloys such as amorphous alloys and high entropy alloy are fast developing, and have significant influence on fields such as the desgin and development of metallic materials, structural materials, green materials, magnetic materials, catalytic materials, and information materials. In this article, we review the history, the development trends, the fundamental scientific issues, applications and basic research chances and challenges of amorphous and related structural disordered alloys. The role of Chinese scientists in the development of the disordered alloys is evaluated and introduced. We propose the corresponding implication and suggestions on the future development and applications of the fast-moving field and the advanced metallic materials in China.

Keywords amorphous alloys, development, scientific issues, applications, implication



汪卫华　中国科学院院士，发展中国家科学院院士。广东松山湖材料实验室主任，中国科学院物理研究所研究员，中国科学院极端条件物理重点实验室主任。主要研究领域：非晶合金材料、非晶态物理等。主持中国科学院、科学技术部、国家自然科学基金委员会等单位的10多项重大课题，参与多项国家科技发展的咨询与评估工作。E-mail: whw@iphy.ac.cn

WANG Weihua　Academician of Chinese Academy of Sciences (CAS), Fellow of the World Academy of Sciences for the advancement of science in developing countries (TWAS). Director of Songshan Lake Materials Laboratory of Guangdong Province, Director of Key Laboratory of Extreme Conditions Physics of Chinese Academy of Sciences (CAS), and Professor of Institutes of Physics, CAS. Dr. Wang's research focuses on science & technology of amorphous matter, applications of metallic glass materials, etc. In recent years, he has presided more than 10 major projects of CAS, Ministry of Science and Technology, National Natural Science Foundation of China, and so on. He has also been involved in the consultation and evaluation of a number of national science and technology development projects.
E-mail: whw@iphy.ac.cn

■责任编辑：岳凌生